



电力市场环境下

梯级水库发电优化调度与风险预警系统研究

原文林 万 芳 著



科学出版社

电力市场环境下梯级水库发电 优化调度与风险预警系统研究

原文林 万 芳 著

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书是作者关于电力市场环境下水库中长期发电优化调度与风险预警系统研究的总结。以我国现运行或模拟运行电力市场理论为基础,采用水能资源系统分析、仿生智能算法、概率统计和风险分析理论,建立电力市场环境下梯级水库发电优化调度模型、多年调节水库年末消落水位优选模型、合约电量月度分解模型、发电补偿效益计算模型,提出能够兼顾计算精度与计算效率的模型求解方法,构建电力市场环境下水库发电优化调度风险预警系统,并以乌江梯级水库发电调度为例进行分析计算。

本书可供水利、流域开发利用、电力市场等专业的科技工作者、管理者及高等学校相关专业的师生阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力市场环境下水库发电优化调度与风险预警系统研究/原文林,万芳著. —北京:科学出版社,2016.11

ISBN 978-7-03-050511-8

I. ①电… II. ①原… ②万… III. ①梯级水电站-发电调度-研究 ②梯级水电站-预警系统-研究 IV. ①TV74

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 268666 号

责任编辑:张颖兵 杨光华/责任校对:孙富明

责任印制:彭 超/封面设计:苏 波

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

武汉市首壹印务有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

开本:787×1092 1/16

2016 年 11 月第 一 版 印张:11 1/2

2016 年 11 月第一次印刷 字数:300 000

定价:48.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

随着我国流域及跨流域大规模巨型水库群的建设 and 投运,逐渐形成了流域梯级水库群联合调度的新格局,给复杂水电能源系统的运行、控制和管理带来了一系列亟待解决的科学应用难题。随着电力市场的逐步完善,市场风险的不确定性、信息不完全性以及主体行为有限理性等多因素导致梯级水库的运营模式发生改变,传统的优化调度准则与调度模型已难以适应目前新的形势。因此,开展电力市场环境下梯级水库发电优化调度研究,确定梯级水库上网电量的结构组成,基于调度风险因素的分析,融入调度决策者的调度经验和风险偏好,实现梯级水库发电优化调度的滚动修正,使梯级水库发电效益最大化,对于提高梯级水库运行管理水平、保证电网的安全经济运行具有重要的社会经济意义和科学研究价值。

对于高维、复杂的梯级水库发电优化调度,影响因素众多,除梯级水库之间水力、电力内在联系因素之外,还有生态、环境、防凌、航运等其他用水部门因素,同时还要统筹考虑水情预报信息、市场信息的可用性及其带来的风险因素,通常是一个多目标、多属性、多阶段的复杂决策过程,具有复杂性、不确定性、动态性等特点。同时,由于系统规模庞大,模型解空间复杂,难以准确快速求解。为此,建立综合考虑社会经济要素、流域生态资源保护以及径流、负荷、电价等不确定性因素的流域性高维复杂梯级水库发电优化调度模型,并寻求能够兼顾计算精度与精算效

率、具有物理机制、通用性好的模型求解方法,确定梯级水库的可发电量及其结构组成,是水电参与电力市场竞争的首要条件,也是本书的主要内容之一。

随着我国电力市场化营运改革进程的推进,对水电参与市场化营运的认识也在逐步深入。由于我国电力市场尚处于初级阶段,水电还未能完全进行市场竞争,目前水电参与上网的发电量主要由合约电量和现货竞争电量两部分组成。纵观国内外电力市场的发展经验,在电力市场初期,合约电量在市场中都占有较大的比例,这既有利于水电规避市场风险,又对市场中的电价平抑起到了积极的作用,同时为参与现货竞争电量的水电报价提供了指导信息。但合约电量若过大,一方面减少了现货竞争电量,不利于水电的市场竞争;另一方面又必然会过多地挤占火电等其他电源的合约电量空间;再一方面,如遇机组检修或事故发生等,无法完成合约电量指标,将受到市场严厉的经济制裁。因此,在确定梯级水库未来时段可发电量的基础上,考虑生态、环境、防凌、航运等用水部门的要求,结合水库电站机组检修计划,科学合理地确定合约电量与现货竞争电量的比例,解决两者之间相互挤占的矛盾,是水电参与电力市场竞争的必要条件,也是本书的主要内容之一。

由于梯级水库入库径流的随机性和中长期径流预报技术的限制,增加了梯级水库调度的不确定性和风险性。在电力市场环境下,利益与风险同在,对于未来时段入库径流估计的乐观与悲观性,决定了调度效益与调度风险之间如何抉择,体现了决策者的不同利益趋势和风险偏好。因此在调度决策过程中,本书开展了基于电力市场环境下梯级水库发电优化调度风险因素的分析,结合水库发电优化调度操作规线,融入决策者对不确定性因素的风险偏好,同时对决策方案给予预警标示,在调度效益与调度风险之间寻求最佳平衡点,是解决理论研究成果难以应用于生产实践的有效途径。

本书的研究成果对于揭示电力市场环境下梯级水库发电优化调度系统的不确定性特征和风险因素,开展电力市场环境下梯级水库发电优化调度与调度方案风险预警系统相关问题和关键技术研究,使水电更加有力地参与市场竞争,规避不确定性因素带来的风险,提高水能资源利用率,实现国家“节能减排”政策,具有重要的科学研究价值和实践意义。

本书研究成果得到了国家自然科学基金项目“电力市场环境下梯级水库发电优化调度与风险预警系统研究”(项目编号:51109189)、“跨流域水库群优化调度三层规划模型与风险预警机制研究”(项目编号:51509089)和中国博士后科学基金项目“梯级水库发电调度预警决策系统研究”(项目编号:20100471007)的资助,并得到了乌江水电开发有限责任公司梯调中心领导和专家的支持,以及郑州大学水利与环境学院同事的指导,在此一并表示感谢!

本书的研究工作是作者在博士研究生导师黄强教授和博士后合作导师

吴泽宁教授的悉心指导下完成的,在此表示由衷的感谢!除了本书作者之外,参加本书内容相关研究的还有于健、方洪斌、曲晓宁、吴承君等,对他们在研究中付出的辛勤劳动表示感谢!

由于作者水平有限,书中难免有疏漏之处,敬请读者批评指正。

作 者

2016年7月于郑州

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 梯级水库发电优化调度模型及求解方法的研究进展	2
1.2 电力市场环境下梯级水库发电优化调度的研究进展	4
1.3 电力市场环境下梯级水库发电调度风险因素的分析	5
1.4 梯级水库发电优化调度的发展前景及趋势分析	6
第 2 章 电力市场环境下梯级水库发电调度的基本理论	13
2.1 电力市场概况	14
2.2 我国电力市场的发展现状	15
2.3 我国水电参与市场竞争的交易类型	19
2.4 水电参与电力市场的竞价模式选择	21
第 3 章 电力市场环境下梯级水库发电优化调度模型的建立	27
3.1 电力市场环境下梯级水库联合优化调度的必要性分析	28
3.2 电力市场环境下梯级水库联合优化调度的可行性分析	30

3.3	电力市场环境下梯级水库发电优化调度所面临的问题	32
3.4	电力市场环境下梯级水库发电优化调度准则	33
3.5	非市场环境梯级水库发电优化调度模型	34
3.6	电力市场环境下梯级水库发电优化调度模型	37
第4章	电力市场环境下梯级水库发电优化调度模型求解方法	39
4.1	逐步优化-逐次逼近动态规划混合算法	40
4.2	混沌蚁群算法	45
4.3	基于协进化的粒子群算法	50
4.4	基于协同差分演化算法	54
4.5	实例分析	59
4.6	模型求解方法的仿真模拟计算分析	65
4.7	发电优化调度模型的仿真模拟计算分析	80
第5章	电力市场环境下梯级水库中多年调节水库年末消落水位研究	85
5.1	研究现状及所存在的问题	86
5.2	电力市场环境下梯级水库中多年调节水库年末消落水位优选模型	87
5.3	模型求解	89
5.4	实例分析	89
第6章	电力市场环境下梯级水库发电调度补偿效益分析	103
6.1	梯级水库发电效益补偿计算的原则	104
6.2	市场环境梯级水库发电补偿效益计算	104
第7章	电力市场环境下梯级水库发电优化调度规则的制定	113
7.1	电力市场环境下梯级水库发电优化调度规则的研究	114
7.2	电力市场环境下梯级水库发电优化调度规则的验证	119
第8章	电力市场环境下梯级水库年度合约电量的确定	121
8.1	年径流量与年发电量的相关性分析	122
8.2	梯级水电站年度合约电量比例的确定	123
8.3	梯级水库年度合约电量保证率的确定	132

第 9 章 电力市场环境下梯级水库年度合约电量月度分解模型	135
9.1 合约电量月度分解模型的建立	136
9.2 基于风险偏好的合约电量月度分解模型	137
9.3 基于风险偏好的合约电量月度分解模型求解	139
9.4 实例模型建立及求解	141
9.5 实例结果分析	143
第 10 章 市场环境下梯级水库发电优化调度风险预警模式研究	147
10.1 梯级水库发电优化调度风险因素辨识	148
10.2 梯级水库发电优化调度预警指标体系构建	149
10.3 梯级水库发电优化调度风险预警模式的建立	153
10.4 市场环境下梯级水库发电优化调度风险排警措施	160
10.5 实例研究	162
参考文献	167

第 1 章 绪 论

随着经济的快速发展和全面建设小康社会进程的推进,我国的电力需求也在逐年上升。为缓解用电压力和避免出现拉闸限电的现象,我国对蕴藏量比较丰富的水能资源进行了科学开发与合理利用,目前已建或正在建设的 12 大水电基地,逐步形成了由多个调节性能较好的水库组成梯级水库群联合调度的局面。除此之外,随着“厂网分开,竞价上网”,我国电力市场正在逐步建立,水电的竞价上网使得梯级水库发电优化调度的准则与目标函数发生了变化,梯级水库发电调度的发电量最大不一定是追求的唯一目标。

水电具有成本低廉、调节灵活、节能环保等优点,在促进经济和社会的可持续发展、维护电网安全运行等方面发挥着重要的作用。据不完全统计,实行梯级水库联合优化运行与实行单库优化运行相比,在几乎不增加任何额外工程投资的情况下,可增发电量 3%~5%。因此,开展梯级水库联合优化调度研究,提高水库控制运用水平和水能资源利用率,对增加电站的发电能力、提高电网运行的可靠性以及解决短期内我国能源短缺问题都有着重要的意义。目前我国正在推行“厂网分开,竞价上网”的发电侧电力市场,随着电力市场改革的逐步完善和深化,梯级水电站群的运行将从传统垄断管理模式下的统一集中决策走向市场竞争化运营模式。电力市场的形成和梯级水库数目的增加,不仅带来发电企业生产和经营管理观念上的重大变

革,而且对梯级水库优化调度等各个环节都提出了许多亟待解决的问题和新的挑战。

1.1 梯级水库发电优化调度模型及求解方法的研究进展

水库发电调度伴随着水库水电站的出现而产生,在世界范围内均有大量的研究。随着相关领域新理论与方法的不断出现,以及计算机和信息技术的发展,水库发电调度技术得到了长足的发展,经历了由单库到库群、由简单到复杂、由常规调度到优化调度的研究过程。但对于水库发电优化调度的研究,由于政府管理体制、文化差异以及不同的发展程度,中西方的研究重点略有差异。

在中长期梯级水库发电优化调度中,前期主要把入库径流视为随机状态进行研究,由于“维数灾”的问题,国内外学者从不同的角度进行了研究。在国外,Foufoula-Georgiou 等(1988)在水库群调度中,首先对系统进行主成分分析(principal components analysis,PCA),寻找一个降维模型,然后利用随机动态规划模型对降维模型进行求解;Ponnambalam 等(1996)采用每次迭代两三个状态变量的方法,使固定下泄策略具有一定的空间相关性;Azevedo 等(2009)提出了相似方法解决三维随机动态规划问题。在国内,李爱玲(1998)针对黄河上游梯级水电站群的兴利优化调度问题进行研究,对这一多阶段非线性随机决策问题,应用值迭代方法求解,由于对区间入流采用二元相关进行描述,有效避免了“维数灾”问题;王金文等(2002)采用逐次逼近随机动态规划方法求解水库群优化调度;Huang 等(2007)应用遗传算法结合随机动态规划方法,研究了中国台湾地区石门和翡翠水库的联合优化调度,该方法虽能从一定程度上减轻“维数灾”,但计算时间过长;任德记等(2007)根据黄河干流调节性能较好的龙羊峡、刘家峡水库的预报调度规律,采用隐随机优化调度方法,选用完全多项式和广义线性多项式优化出最优决策规律。在梯级水库随机优化调度中,虽然国内外专家学者试图通过各种手段解决梯级水库随机优化调度中存在的“维数灾”问题,但大量的研究工作表明,多水库系统的径流随机描述必须考虑到各水库入库径流存在时间和空间上相互关联的复杂情况,而略为复杂的径流随机描述就会给多库联合调度模型的求解带来无法承受的計算工作量,随机优化模型只适用于不超过三个水库联合运行的优化调度问题;同时对于包含多年调节水库的梯级水库随机动态规划模型求解,由于多年调节水库年末消落水位难以确定,国内外研究成果相对较少。

众多学者通过统计分析理论和利用径流预报技术,对确定性模型的求解

展开了研究,同时随着系统科学以及计算机技术的发展,越来越多的新技术、新方法应用到梯级水库发电优化调度模型求解中,取得了丰硕的成果。在国外,Turgeon(1981)提出了逐步优化算法,其优点是状态变量不必离散,其缺点是计算结果以及计算时间受初始轨迹线的影响;Kumar等(2007)把粒子群算法应用到水库优化调度中;Momtahan等(2007)提出了应用实数编码的遗传算法进行水库调度规则的制定,参数通过系统模拟得到的目标值进行优化,利用历史径流资料进行模拟计算,结果表明实数编码的遗传算法进行水库调度规则制定是有效的;Raheleh等(2008)应用模拟遗传算法进行水库优化调度;Azevedo等(2009)针对梯级水电站群的非线性特点,对多个流域的74个电站系统应用内插点的方法进行求解;Rani等(2010)首先把模拟退火算法应用到水库优化调度中,并与整数规划进行了对比分析,结果表明前者具有计算精度与计算效率高于后者的优点。在国内,张勇传等(1981)利用大系统分解协调观点对并联水库水电站的联合优化调度问题进行了求解;黄强等(1996)将大系统递阶控制理论应用到梯级水库发电优化调度中;周晓阳等(2000)提出水库系统辨识型发电优化调度方法;艾学山等(2007)在考虑水库运行综合利用要求的前提下,利用正向搜索和逆向搜索相结合的方式寻找水库优化调度过程的大量可行轨迹,把目标函数较大的几个可行轨迹作为DDDP方法的初始轨迹分别进行再寻优计算;马光文等(1997)将遗传算法应用到梯级水库发电优化调度中;张双虎等(2004)将并行组合模拟退火组合算法应用到水库调度中,研究结果表明该方法明显优于标准遗传算法;武新宇(2006)提出了水电站群优化调度的两阶段粒子群算法,并将其成功应用到云南电网主力水电站群的优化调度中;左幸等(2006)提出了三角旋回算法在水库中长期优化调度中的应用;杨俊杰等(2007)提出了一种新的多目标粒子群优化(multi-objective particle swarm optimization, MOPSO)算法,并将该方法应用于三峡梯级多目标优化调度问题的计算;王志良等(2007)把基于混沌优化算法和蚁群算法相结合的混合算法应用于求解水库优化调度问题,利用蚁群算法信息素正反馈的优点,改善了混沌搜索的盲目性,提高了搜索的效率;刘攀等(2007)综合动态规划和遗传算法的优点,基于贝尔曼最优化原理将水库优化调度按阶段划分为若干多目标决策子问题,各子问题采用混合编码的多目标遗传算法求解,从而提出了一种求解水库优化调度问题的动态规划-遗传算法;周慕逊(2007)采用自适应粒子群算法(adaptive particle swarm optimization, APSO)对水库优化调度问题进行了研究;原文林等(2009; 2008a; 2008b)对模型的求解方法也进行了大量的研究,先后提出了改进的粒子群、蚁群、差分进化算法、禁忌搜索算法及这些智能算法的混合算法在梯级水库发电优化调度中的应用,在满足计算精度的基础上,也一定程度减少了

计算耗时。上述研究虽然在很大程度上缓解了“维数灾”问题,但仍然存在网络拓扑不易确定、局部最优解、解的稳定性和收敛性等问题,限制了现代智能算法在高维、复杂梯级水库发电优化调度生产实践中的应用。

1.2 电力市场环境下梯级水库发电优化调度的研究进展

随着我国电力市场的建立与完善,发电侧市场也逐步开放,水电将在市场中扮演什么样的角色,许多学者对此进行了探讨,建立了水电参与市场竞争的初步理论。对于水电参与市场竞争的模式,由于国内外体制和国情的差异,研究的侧重点也不尽相同。在国内,欧述俊(2003)针对峰谷电价差、发电量最大并不意味着效益最大这一问题,提出了考虑峰谷电价因素的水库发电优化调度方法;蔡兴国等(2003)讨论了影响水电电价的水价及水电机组启停费用因素,提出了将水火电混合动力系统划分为两个独立的竞价子集,在各子集内部依据购电费用最低的原则竞价上网;成立芹(2004)针对电力工业现状,在借鉴国外电力市场经验的基础上,论述了我国现阶段电力市场的运行模式、定价方法及其影响因素,研究了相关的竞价策略模型及其均衡解,以及水电站的优化调度策略;曾鸣等(2004)就厂网分开后,在电力市场环境下,针对水电比重较大的省份或地区提出了水火电分离运作与整体优化的市场模式,具体研究了水火电优化配置方法及其实施方案,并通过具体的数据测算出水、火电优化配置电价,最后对所设计方案的经济效益进行了评估;全宏兴等(2007)从电力市场的规则入手,对水电生产中遇到的发电能力等要素进行数学统计处理,采用概率模型,建立基于风险情况下收益最大的数学模型,对水电企业的合同电量确定以及计划安排等问题进行了研究;李厚俊等(2007)从电价机制、市场模式、竞价空间以及开放的市场种类等方面入手,对目前各区域电力市场规则进行简要比较,分析了这些市场规则的不同特点,以及这些规则对水电企业的影响;原文林(2009)在众多专家学者研究的基础上,针对不同的水电站类型参与市场竞争,分别进行了阐述。在我国电力市场建设初级阶段,水库发电优化调度研究主要针对水电参与市场竞争的模式以及电价的确定等进行初步的分析探讨,并没有建立水电参与市场竞争的完整的理论体系。

由于合约电量在电力市场中的作用与意义重大,相关学者对此展开了广泛的研究。戴铁潮等(2000)结合浙江电网的实际情况,综合考虑了分解期间机组的所有计划检修、合同电量的月度滚动修改、年度合同电量总量调整、机组的最低技术出力和非竞价电源等因素,提出了确定性合同电量分解算法;

黎灿兵等(2007)将合约电量分解归纳为二次规划的优化问题,提出了能考虑检修、水电电量受限、热电联产等特殊问题的进度系数概念,并根据进度系数提出逐段法进行分解,使各个时间单元每个发电厂的进度系数尽可能保持均衡;赵宇等(2007)依据月度预测负荷,考虑电厂发电量上下限和检修计划,以全年各月度中所有电厂月度总发电量与各月度的预测负荷差值之和最小为目标函数,将年度合同电量分解到月;温丽丽等(2008)提出了火电机组月度合同电量分解算法,该方法兼顾了电网调度的公平性和经济性,综合考虑了机组月度检修计划调整、合同电量的滚动修正、发电与负荷之间的平衡、最大/最小发电量约束等因素;姜生斌等(2008)结合水电站运行特点,以安全、可靠、经济为原则,建立以月度交易市场收益最大为目标的年度合同电量分解模型,用置信水平的方式表示发电流量和电价等影响水电站发电收益的不确定因子,并运用一次二阶矩法对不确定性因子引起的风险进行分析求解,确定了月度交易市场竞争收益与风险的定量关系;周婷等(2008)针对水电站的月发电量的不确定性及月间发电量不均匀性,进一步建立基于月发电量序列概率特征分析的年度期货电量分解模型,并给出模型求解算法;陈建华等(2009)提出了“发电商申报法”分解合同电量,在考虑检修、出力约束、系统可分解合同电量和系统必需合同电量等因素后,采用基于误差的差异度评估函数建立多目标优化模型,并分别采用“线性加权求和法”和“极小极大值法”将原模型转换为单目标优化;苏鹏飞(2010)对市场环境下考虑不确定性并计及风险的年度合约电量向月度分解的问题进行了研究。在上述合约电量的研究中,研究成果多以单库为研究对象,对于梯级水库中存在的电力补偿,增加了合约电量确定及分解的复杂性,同时合约电量的分解与调度期初水库水位、入库径流等因素密切相关,但从目前研究成果来看,均未考虑上述因素。

1.3 电力市场环境下载级水库发电调度风险因素的分析

对于电力市场环境下载级水库发电调度风险因素的分析,由于国内研究起步较晚,研究成果相对较少,而国外研究较多,相关研究均集中在运行方式和因竞价不确定性因素所带来的风险,而且由于管理方式的差异,研究的侧重点也有所不同。Mo等(2001)描述了一种适用于水电运营随机优化问题的价格模型,并阐述了该模型如何用于解决水电的运营决策和风险规避问题;Ni等(2004)通过在目标函数中引入与边际电价预测方差有关的罚函数来实现风险管理;Kristiansen(2004a)进一步考虑低于期望收益的罚函数,结合双随机动态优化和随机动态优化来解决水电厂的风险管理问题;Cabero等

(2005) 和 Barquin 等(2005) 用随机优化方法来确定水电的运营计划和规避金融风险。在国内,刘嘉佳(2007) 考虑市场价格的不确定性,以条件风险价值 CVaR 为风险计量指标,建立了单期发电权的投标组合模型,通过协调方案利润和风险,使水电企业在获得更大收益的同时,实现对不同的风险态度和不同的市场条件变化下的电量分配优化,从而规避其他市场可能存在的风险。

1.4 梯级水库发电优化调度的发展前景及趋势分析

1.4.1 梯级水库发电优化调度的发展前景

1. 水电发展的动力:能源结构调整的需求

能源是现代化的基础和动力,改革开放 30 多年来,我国经济持续快速发展,能源需求迅速增加。2013 年,我国一次能源消费总量已达到 37.5 亿吨标准煤,是世界第一大能源生产和消费国。但由于目前我国的经济发展和经济活动水平有限,能源的消费水平还很低,今后伴随着经济的发展能源消费需求还将大幅度增长。2010 年之前,我国电力需求年均增长 7% 左右,年均需新增装机容量 23 000 ~ 26 000 MW。由于我国能源消费以煤为主,由此产生的环境污染、生态破坏、地表塌陷、酸雨等问题日益严重,减排温室气体、应对气候变化的压力也越来越大。为此,我国在不断提高能源利用效率、节约能源资源的同时,积极开展节能减排发电优化调度,大力开发利用可再生能源,加快调整能源结构,转变发展方式,优化资源配置,促进降耗增效,逐步降低煤炭等化石能源在能源消费结构中的比重,并把此视为我国能源的发展趋势。根据国家能源局网站消息,2014 年 1 ~ 9 月,全国全社会用电量累计 $40\,975 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,同比增长 3.9%,全国发电设备累计平均利用小时为 3 204 h,同比减少 174 h。其中,水电设备平均利用小时为 2 723 h,同比增加 84 h;火电设备平均利用小时为 3 512 h,同比减少 182 h。全国用电量是在增加的,但火力发电的比重正在逐步下降,水力发电以及其他新能源发电模式已经开始替代传统的煤炭发电,中国的能源结构调整初见成效。水电是可持续利用的清洁能源,在保护生态、妥善解决移民问题的条件下,科学开发、合理利用水能资源是保障我国能源供应的重要措施。

水电是技术成熟的可再生能源发电方式,一直受到世界各国的高度重视。20 世纪 30 ~ 70 年代是发达国家水电建设的高峰期,目前发达国家的水能资源已基本得到开发,由于经济发展阶段的差异,发展中国家正在陆续进入

水电建设的高峰时期。我国西高东低的地势,蕴藏着得天独厚的水能资源,理论蕴藏量约为 694 400 MW,年发电量约 $60\,000 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$;技术可开发装机容量 540 000 MW,年发电量 $24\,700 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$;经济可开发装机容量约 400 000 MW,年发电量 $17\,500 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 。经过多年的努力,我国水电建设取得了很大的成绩,水电装机容量持续增长,到 2013 年年底,全国水电装机容量达到了 282 000 MW,年发电量 $9\,116.4 \times 10^8 \text{ kW} \cdot \text{h}$,分别占全国发电装机总容量的 22.4% 和发电量的 17.4%。按照能源中长期发展规划,到 2020 年常规水电装机容量达到 328 000 MW,占电力总装机容量的 28.6%,水电开发程度将达到 60%。

2. 水电发展的形势:流域的开发

从空间分布上看,全国水电资源总量的 3/4 集中在经济相对落后、交通不便的西部地区,其中云、川、藏三省(自治区)就占 60%。其次是中南和西北地区,分别占 15.5% 和 9.9%。而经济发达、用电负荷集中的华东、华北、东北三大地区,包括辽、吉、黑、京、津、冀、鲁、苏、浙、皖、沪、粤、闽 13 个省(直辖市)仅占 7% 左右,且开发程度较高。从时间分布上看,我国大陆多属季风气候区,河川径流年内、年际分布不均,丰枯季节、丰枯时段流量相差悬殊,自然调节能力不好,稳定性差。因此,为满足能源的实际需求,必须重视具有调节性能的水库水电站开发,发挥流域梯级水库及区域水库群的联合调度优势,发挥大区域水库之间的相互补偿优势。例如,国务院批准的清江隔河岩水库、高坝洲水库及水布垭水库的开发方针为“流域、梯级、滚动、综合”,边组织生产,边探索总结,在体制、管理模式中成功建立以业主负责制和现代企业的公司化管理机制为特征的“清江体制”,形成流域开发、滚动发展。同时按照我国能源白皮书中提出的要求,中国今后将推进水电流域梯级综合开发,加快大型水电建设,因地制宜开发中小水电,适当建设抽水蓄能电站。所以,流域梯级开发是今后水电发展的必然趋势,同时流域梯级开发也加快了我国水电的发展。

随着流域的开发,流域梯级水库已经初具规模,并根据水资源的分布情况、开发条件和经济发展的需要,我国提出了建设流域水电开发基地的方案,目前已建成或正在建设黄河上游、雅砻江、乌江等 12 大重点水电基地。

3. 水电发展的机遇与挑战:电力市场的建立

由于历史的原因,我国目前的电力市场是一个由计划经济体制向市场经济体制转换阶段的畸形市场,需求与供给关系十分复杂,真正的市场机制并没有形成。作为电力产品供给整体的发、输、供三个环节,过去统一由政府电力部门投资建设与控制运行。改革开放后,为改变电力供给紧张局面,国家放开发电市场,走多渠道、多层次、多元化集资办电之路,但实行的是还本付息

电价,因此没有形成真正意义上的市场竞争。

随着“厂网分开,竞价上网”,我国的电力市场正在逐步地建立。按照电力体制改革的总体部署,电力工业将继续推进各项配套改革,在组建区域电网公司的基础上,积极稳妥地全面推进区域电力市场建设,建立电力市场运行规则和政府监管体系,逐步实行新的电价机制。目前,部分区域电力市场已在运行,例如,华东颁布了《华东电力市场运营基本规则》,这标志着华东电力市场对发电侧市场的逐步开放;2014年11月,国家发展和改革委员会下发了《关于深圳市开展输配电价改革试点的通知》,预示着电力市场改革再次开始实质性行动。

电力市场的建立,对于水电的发展既是一种机遇,又是一种挑战。水电对于火电成本相对较低,若市场发电侧完全开放,则水电具有较强的竞争优势,特别是流域梯级的滚动开发,水电实行梯级水库联合优化调度,将会给电网提供价廉质优的电能。然而,水电又具有自身的局限性,由于水电受到来水等不确定性因素的影响和中长期径流预报技术的限制,在变化的市场环境下,将会面临更大的调度难题。所以,电力市场的建立,对于水电是一个发展的机遇,同时也是一种极大的挑战。

综上所述,在我国能源紧缺和节能减排政策实施的情况下,随着流域梯级的开发和电力市场的建立,水电得到了较快的发展,梯级水库的规模也越来越大,变化环境下的梯级水库优化调度属于高维、复杂环境下的多约束优化问题,成为水资源系统工程及其交叉领域研究的热点与难点问题,本书正是在此背景下,开展电力市场环境下梯级水库发电优化调度理论与实践的探索研究,为电力市场环境下梯级水库发电优化调度提供理论支撑和技术参考。

1.4.2 梯级水库发电优化调度研究中所存在的问题

水库优化调度作为水资源系统工程的一个分支,该研究工作在我国起步较晚,虽然仅经历了半个多世纪,但是在众多学者的不懈努力下,至今已形成了一套比较完整的理论框架。水库优化调度作为一门应用学科,必然要与生产实践相结合,否则该学科的发展就会失去其生命意义。但是在国内,甚至在科学技术比较发达的美国,并入电网系统的大中型水库水电站管理者虽然明白用优化调度理论指导实际水库调度能够获得巨大的经济效益,但仍很少把理论计算所得的优化调度方案应用于日常调度工作中,究其原因就是该学科的理论与实际应用两方面发展不协调,具体来说主要有下面几点。

(1) 数学模型的片面性。数学模型是对所解决问题的抽象描述,由于人类